

PSC 거더교의 장경간화 평가 기법 : I. 경간 평가 기법의 제안

Assessment for Extending Span Ranges of PSC Girder Bridges : I. Proposed Strategy to Estimate the Spans

전세진* · 최명성** · 김영진***

Jeon, Se Jin · Choi, Myoung Sung · Kim, Young Jin

Abstract

PSC girder bridge is known to be more economical than other types of bridges and has been usually applied to a span range of 25 m to 35 m according to the standard shapes for highway bridges in Korea. The spans of the recently developed new types of PSC girders are also limited to 50 m at most. In this study, therefore, feasibility of the long-span PSC girder that reaches more than 50 m is investigated by applying several strategies from the perspectives of materials, design and construction. A systematic procedure is proposed that can be used to assess the effect of each strategy on the span. The proposed scheme adopts a graphical approach that represents a relationship between the number of prestressing tendons and the span, and is derived on a basis of safety assessment equations of the girder in each stage of fabrication and in service. In the companion paper, the amount of span extension is quantitatively evaluated by applying the proposed scheme into a sample PSC girder bridge.

Keywords : PSC girder, long span, prestressing tendon, high strength, multistage prestressing

요 지

PSC 거더교는 타 공법에 비해 매우 경제적인 교량 형식이지만 국내에서는 PSC 빔 표준도에 근거하여 도로교의 경우 25~35 m 경간에 주로 적용되어 왔다. 이러한 경간상의 제약사항을 극복하기 위해 다양한 신형식 거더교들이 개발되었지만 주로 50 m 이하 경간에 적용되고 있는 실정이다. 따라서, 이 연구에서는 PSC 거더교를 50 m 이상의 경간까지 확장할 수 있는 장경간화 기법들을 재료, 설계 및 시공 측면으로 나누어 분석함으로써 장경간화의 가능성을 고찰해 보았다. 이 때 각 기법이 경간 증가에 미치는 기여도를 일목요연하고 용이하게 평가할 수 있는 방법론을 제안하였다. 제안된 방법은 허용응력 설계법에 근거한 PSC 거더의 단계별 안전성 평가식을 프리스트레싱 텐던의 개수와 경간의 관계를 나타내는 그래프로 치환하여 설계 가능 영역을 찾아내는 방식이며, 일반 PSC 거더, 단단계 긴장식 PSC 거더, Decked PSC 거더로 구분하여 수식을 전개하였다. 후속 논문에서는 이를 실교량 예제에 적용하여 경간 증가량을 분석하였다.

핵심용어 : PSC 거더, 장경간, 프리스트레싱 텐던, 고강도, 단단계 긴장

1. 서 론

국내의 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 거더교는 한국도로공사의 PSC 빔 표준도에 근거하여 도로교의 경우 25~35 m 경간에, 철도교에서는 20~25 m 경간에 주로 적용되어 왔으며, 그러한 경간에 대해서는 가장 경제적인 형식으로 인식되어 왔다.

일반적인 PSC 거더를 사용할 때의 경간 또는 형고상의 제약사항을 극복하기 위해 일찍이 해외에서 Preflex 합성거더교가 개발되어 국내에서는 1980년대 중반부터 적용된 바 있지만 경제성 등의 문제로 최대 50 m 경간까지 사용되고 있다. 해외에서는 미국과 캐나다를 중심으로 1980년대부터

PSC 거더교를 장경간화하여 고가의 강제 교량을 대체함으로써 저비용으로 고효율을 추구하려는 연구가 활발하게 진행되어 왔다(이형준 등, 2008). 미국의 경우 1950~1960년대에 개발된 AASHTO Type I~VI 거더를 개선하여, 1980년대부터는 AASHTO/PCI Bulb-T 거더 및 각 주별로 차별화된 거더 단면이 개발되어 사용중이다. 한 예로 네브래스카주의 NU(University of Nebraska) Bulb-T 거더, 뉴잉글랜드 지방에서 쓰이는 New England Bulb-T 거더(Bardow 등, 1997) 등을 들 수 있으며 전자의 경우에는 60~65 MPa의 설계기준강도 및 2.8 m의 형고로 65 m 경간까지 시공된 사례도 있다. 그 외에 분절(spliced) PSC 거더 기법(Abdel-Karim 등, 1992)의 적용은 거더 운반이나 인양시의 제약사

*정회원 · 교신저자 · (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : jsj@dwconst.co.kr)

** (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 선임연구원 (E-mail : iamfame@dwconst.co.kr)

***정회원 · (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 전문위원 · 공학박사 (E-mail : kimyj@dwconst.co.kr)

항을 극복하여 90 m 내외의 경간까지도 가능케 하였다. 국내의 경우에는 1990년대 말에 고강도 콘크리트를 PSC 거더에 적용하려는 연구를 시작으로(한국도로공사, 1998), 2000년 이후에는 다단계 긴장기법이나 합성 및 복합구조를 활용한 다양한 신형식 거더교들이 개발되었지만 이러한 형식들도 도로교의 경우 주로 50 m 이하 경간에 적용되고 있는 실정이다(김광수 등, 2008). 그렇지만 국내에서도 PSC 거더의 장경간화에 대한 폭넓은 공감대가 형성되어 현재 50 m 이상까지 장경간화하려는 연구가 계속적으로 진행되고 있다(박영하, 2008).

그러나, 아직까지 국내에서 50 m 이상의 경간에 거더교 형식을 실제 적용할 때에는 PSC 박스거더교나 강 박스거더교가 주를 이루어 왔다. PSC 거더를 박스거더교가 지배하는 50 m 이상 경간까지 확장하기 위해서는 무엇보다도 박스거더교 이상의 경제성과 시공성을 확보하는 것이 급선무라고 생각된다. 따라서, 단순히 PSC 거더의 형고를 늘려서 장경간화하려는 시도는 조형미, 경제성 및 기술성 측면에서 무의미한 접근법이다. 그간의 국내외 연구를 살펴보면 재료, 설계 및 시공 측면에서 적절한 형고를 유지하면서도 장경간화에 기여할 수 있는 여러 가지 기법들이 제안되어 왔음을 알 수 있다(PCI, 2003; White 등, 2004). 하지만 지금까지의 분석결과에 의하면 한가지 기법만을 적용할 경우 효율성이 떨어져 장경간화에 한계가 있으며, 여러 가지 기법들을 최적으로 조합하는 것이 경제성 측면에서 바람직한 것으로 알려져 있다. 이 때 최적의 조합을 도출하기 위해서는 단순히 설계 요인들을 바꾸어 가며 반복적인 설계를 수행하여 결과를 비교하기 보다 각 설계 요인이 경간에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 설계 요인과 경간과의 관계를 넓은 안목으로 파악할 수 있는 통찰력이 우선적으로 요구된다. 이는 장경간화를 위해 적용해야 할 기법들의 우선 순위를 파악하는 데에도 큰 도움이 될 수 있다.

따라서, 이 연구에서는 먼저 장경간화 기법들을 재료, 설계 및 시공 측면으로 분류하고, PSC 거더 설계에 있어 가장 핵심을 이루는 허용응력설계법에 근거하여 각각의 장경간화 기법이 경간 증가에 미치는 기여도를 일목요연하고 용이하게 평가할 수 있는 방법론을 제안하였다. 후속 논문(전세진, 2009)에서는 이러한 기법을 실교량 예제에 적용하여 경간 증가량을 분석하였다. 검토 대상은 강제와 콘크리트가 합성되는 형식은 배제하고 콘크리트 단면과 텐전이 사용되는 전형적인 PSC 거더의 경우로 국한하였으며, 기존에 국내에서 제안되거나 적용되었던 기법들과 더불어 Decked PSC 거더교와 같이 국내 적용 사례가 없는 신개념의 PSC 거더교도 함께 분석하였다.

2. PSC 거더교의 장경간화 기법

2.1 재료 측면

고강도 콘크리트의 적용은 재료 측면의 개선 사항들 중 가장 우선적으로 고려해 볼 만한 항목이다. 실제로 PSC 거더교에 대한 고강도 콘크리트의 사용은 해외에서는 실용화 수준에 이르렀으며, 장경간 PSC 거더교에 적용되는 조합 기법들 중에 거의 필수적으로 포함되고 있다. 국내의 경우에도

고강도화는 PSC 거더교의 본격적인 장경간화 연구 중 가장 먼저 수행된 분야이다(심종성 등, 1999; 심종성 등, 2000; 이형준 등, 2002; 한국도로공사, 1998). 한국도로공사의 표준도는 40 MPa의 설계기준강도를 갖는 반면 한국도로공사의 연구에서는 60~80 MPa의 적용이 검토되었고, 미국에서는 이미 1990년대 후반에 70~100 MPa 강도로 40~50 m 경간의 PSC 거더교를 시공한 사례가 있다. 후속 논문(전세진, 2009)에서 분석하겠지만 고강도 콘크리트가 장경간화가 기여하는 바는 매우 두드러진 것으로 나타나는데, 거더의 고강도화가 주된 고려사항이며 바닥판의 고강도화는 경간에 비교적 미소한 영향만을 미친다. 하지만, 주의할 점은 연구 측면에서 달성 가능한 고강도 수준과 PSC 거더교에 실용화되어 적용될 수 있는 고강도 수준은 구별되어야 한다는 것이다. 특정 현장에서 전용되는 배치 플랜트가 아닌 일반 레미콘사에서 생산이 용이해야 한다는 점, PSC 거더가 일반적으로 공장이 아닌 현장에서 제작됨에 따라 품질 변동성이 크다는 점 등의 국내 실정을 종합적으로 고려하여 강도의 수준을 결정해야 한다.

경량 콘크리트를 사용하여 자중을 경감하는 기법도 장경간화에 효과적일 것으로 생각되며, 한 예로 1990년대 초 노르웨이에서는 경량골재를 사용하여 콘크리트의 단위중량을 기존의 2,300 kgf/m³에서 1,850~1,900 kgf/m³까지 낮춘 40 m 경간의 PSC 거더교를 건설하였다(Melby 등, 1996). 노르웨이의 경우에는 경량 콘크리트의 설계기준강도를 55~65 MPa까지 확보하여 사용하였지만 일반적으로 경량화와 고강도화를 동시에 추구하는 것은 용이하지 않다.

한편, PSC 거더의 장경간화는 프리스트레스의 도입량과 밀접한 관계가 있으므로 긴장재(PS 강제) 측면에서도 개선의 여지가 있다. 즉, 국내의 대부분의 PSC 거더에는 포스트텐셔닝 방식이 사용되는데, 장경간화에 따라 긴장재와 덕트의 개수가 늘어나면 덕트나 정착구가 밀집화되어 타설 및 다짐 작업시 어려움이 발생할 수 있고, 덕트나 정착구의 최소간격 기준을 벗어날 우려가 있다. 정착구의 최소간격은 정착구 부근의 응력집중을 고려하여 거더 단부의 건전성을 확보하기 위한 것으로 정착구 제조사별로 차이가 있으며 엄밀히 말해 콘크리트의 강도와도 관련되어 있다. 이에 대한 대처법으로, 첫째, 대직경 긴장재를 사용하여 긴장재의 개수를 줄일 수 있다. 현재 국내에서는 12.7 mm와 15.2 mm 직경의 강연선이 표준적으로 사용되고 있다. 둘째, 덕트당 삽입되는 강연선의 개수를 늘려서 덕트의 개수를 줄여 밀집화를 방지할 수 있다. 첫째 및 둘째 방법을 통해 정착구 최소간격의 제한으로부터 다소의 여유를 확보할 수 있는 반면 덕트의 증가된 직경으로 인해 복부 단면이 일정한 두께를 확보해야 한다는 제약사항이 생긴다. 거더 단면적이 일정한 상태에서 단면의 휨효율성을 높이기 위해서는 복부 두께를 최소화해야 하므로 단면 효율성 면에서는 다소 불리하다. PSC 빔 표준도는 12.7 mm 직경 강연선 12개를 66 mm 직경의 덕트에 삽입하는 방식을 취하는 반면 최근 장경간화를 위해 개발된 신형식 PSC 거더교에서는 예를 들어 15.2 mm 직경의 강연선 15개를 85 mm 직경의 덕트에 삽입하는 등, 첫째와 둘째로 언급한 사항들은 이미 반영되고 있는 추세이다. 셋째, 현재 활발히 연구되고 있는 사항으로 고강도 긴장

재의 사용이 있다. 예를 들어 일반적으로 사용되는 강연선의 인장강도 1,860 MPa를 2,200 MPa급으로 향상시키려는 시도가 있다. 하지만, 아직까지 국내외에서 이를 뒷받침할만한 설계 및 시방기준이 정립되지 못한 상태이며 필요시 정착구 등 새로운 부속 장치의 개발이 요구될 수도 있다. 최근 연구되어 온 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 긴장재의 여러 가지 장점 중의 하나도 고인장강도이지만 역시 실적용을 위해서는 유사한 문제들을 해결해야 한다.

2.2 설계 및 시공 측면

장경간화와 관련하여 설계 측면에서 단면형상을 개선하여 최적화하려는 국내외의 연구 동향은 서론에서 일부 언급한 바와 같다. 분석방법론에 다소의 차이는 있으나 기존 I형 단면의 거더보다 상부플랜지 폭이 확장되고 세부적인 형상이 최적화된 Bulb-T형 단면이 더욱 효율적이라는 데에는 이견들이 없다(박영하 등, 2005; 심종성 등, 1999; 심종성 등, 2000; 조선규 등, 2004; Meir 등, 1997). 단면의 휨효율을 평가할 수 있는 대표적인 지표는 식 (1)과 같이 정의되는 휨효율 계수이다(신현목, 2008). 여기에는 상하연에 대한 단면계수와 단면적 개념이 모두 포함되어 있어 휨효율과 더불어 재료비를 고려한 경제성의 척도로도 활용될 수 있다.

$$Q = \frac{I_c}{A_c y_b} \quad (1)$$

여기에서, A_c 및 I_c 는 각각 단면적 및 단면2차모멘트, y_b 및 y_t 는 각각 도심으로부터 상연 및 하연까지의 거리이다. 바닥판 합성 전 또는 후의 휨효율 계수가 모두 중요함에 주의해야 한다.

다경간 거더의 경우에는 바닥판 타설 전 또는 포장과 같은 2차 고정하중 재하 이전에 일련의 단순지지된 거더들을 연속화하여 거더 경간에서 발생하는 휨모멘트를 감소시킴으로써 장경간화가 가능하다.

국내에서는 특히 긴장법의 개선을 통해 PSC 거더의 경간을 늘이고자 하는 노력을 경주하였는데 시공 단계를 고려한 다단계 긴장법이 그 대표적인 예이다(Han 등, 2003). 보통 2단계의 긴장법을 채택하는데 타설된 바닥판이 경화되어 합성되기 이전에 2차 텐던을 긴장하는 것이 합성 후 긴장하는 것보다 효율성 면에서 유리하다. 현장타설 바닥판의 경화 이전에 2차 긴장을 실시하는 것에 어려움이 있을 경우 프리캐스트 바닥판을 거처하고 거더와 합성하기 이전에 2차 긴장을 실시하는 것이 유력한 대안이 될 수 있다.

한편, 해외에서는 그림 1과 같이 Decked PSC 거더교라 하여 거더 제작 단계에서부터 바닥판을 일체로 타설하고 긴장을 실시하여 합성거더를 구성한 후, 이러한 합성거더들을 교각 또는 교대 위에 거처하고 긴장재나 전단연결재를 이용

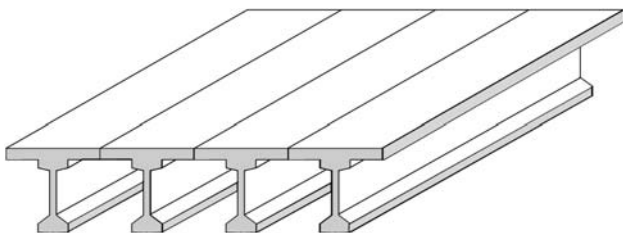


그림 1. Decked PSC 거더교

하여 횡방향으로 일체화시키는 기법도 사용되고 있다(Smith 등, 2008). 이러한 Decked PSC 거더는 합성거더의 증가된 자중에 대처할 수 있는 운반이나 가설 여건만 확보된다면 급속 시공의 잇점과 더불어 일반적인 PSC 거더 이상의 프리스트레스를 도입할 수 있어 장경간화에도 기여할 수 있다.

또한, 미국과 캐나다를 중심으로 장경간 PSC 거더교 시공 시 빈번히 채택되고 있는 분절(spliced) 거더 기법이 있다. 이는 PSC 거더를 거더 길이 방향으로 몇 개의 세그먼트들로 나누어 제작하고 운반한 후 현장에서 각 세그먼트들을 긴장재 등의 각종 방법을 이용하여 일체로 연결하여 가설하는 것이다(Abdel-Karim, 1992). 이러한 과정에서 필요시 연속교도 자연스럽게 형성될 수 있다. 분절 시공법은 분절 자체가 장경간화에 기여한다기 보다는 장경간화에 따른 거더 자중의 증가에 대처하여 운반이나 가설시의 편의를 도모하기 위해 도입된 방식으로 볼 수 있다.

마지막으로 미국에서 PSC 거더 제작시 널리 사용되는 프리텐셔닝 방식을 채택하거나, 포스트텐셔닝과 프리텐셔닝 방식을 병행하면 덕트 및 정착구 배치에 대한 제약사항이 최소화되어 장경간 거더의 콘크리트 단면 설계시 유리할 수 있다.

3. 경간 평가 기법

3.1 개요

2장에서 언급한 각각의 장경간화 기법을 적용하여 PSC 거더교를 설계해 봄으로써 각 기법의 경간에 대한 기여도를 대략적으로 알아볼 수 있다. 하지만, 이처럼 단순한 설계를 반복할 경우에는 많은 시간과 노력이 소요되는 반면 막상 각 설계 요인과 경간과의 관계를 넓은 안목으로 파악하고, 장경간화에 대한 기여도가 커서 우선적으로 적용해야 할 기법들을 도출하는 데에는 어려움이 클 수 있다. 이러한 시행착오를 최소화하여 목표로 하는 경간을 보유한 PSC 거더교를 설계할 수 있는 기법 또는 기법들의 조합을 파악하기 위해서는 단순한 설계와는 차별화되는 개선된 분석 기법이 요망된다.

PSC 거더교의 설계시 허용응력설계법 및 강도설계법에 의한 안전성 검토, 사용성 검토 등이 수행되지만 그 중에서도 가장 핵심적인 사항은 허용응력의 만족 여부이다. 따라서, 이 연구에서는 허용응력설계법에 근거한 PSC 거더의 단계별 안전성 평가식을 프리스트레싱 텐던의 개수와 경간의 관계를 나타내는 그래프로 치환하여 설계 가능 영역을 찾아내는 방식을 제안하였다. 이러한 도식적인 방법을 통해 각각의 기법이 경간 증가에 미치는 기여도를 일목요연하고 용이하게 평가할 수 있음을 보였다. 평가식의 형태 등 안전성 평가 방법론에 차이가 큰 몇몇 장경간화 기법들은 부득이 평가 절차를 구분해야 하며, 그 결과 크게 일반 PSC 거더, 다단계 긴장식 PSC 거더, Decked PSC 거더로 구분하여 수식을 전개하였다.

3.2 평가 기법의 제안

3.2.1 일반 PSC 거더

일반적인 PSC 거더의 허용응력설계법에 근거한 안전성 평

가시 경간 중앙을 기준하면 거더 상연의 응력 f_{ci} 및 하연의 응력 f_{cb} 에 대하여 식 (2) 및 (3)과 같은 긴장시의 평가와 식 (4) 및 (5)와 같은 사용시의 평가를 실시한다.

$$f_{ci} = \frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i e_p}{I_c} y_t + \frac{M_{d1}}{I_c} y_t > f_{ci, g, ta} \quad (2)$$

$$f_{cb} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i e_p}{I_c} y_b - \frac{M_{d1}}{I_c} y_b < f_{ci, g, ca} \quad (3)$$

$$f_{ci} = \frac{P_e}{A_c} - \frac{P_e e_p}{I_c} y_t + \frac{M_{d1} + M_{d2}}{I_c} y_t + \frac{M_l}{I_c^*} y_{t, g}^* < f_{ck, g, ca} \quad (4)$$

$$f_{cb} = \frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e e_p}{I_c} y_b - \frac{M_{d1} + M_{d2}}{I_c} y_b - \frac{M_l}{I_c^*} y_{b, g}^* > f_{ck, g, ta} \quad (5)$$

여기에서, $P_i = nA_{ps}f_{pi}$, $P_e = nA_{ps}f_{pe}$ 이며 n 은 덕트의 개수(이 논문에서는 텐던의 개수로도 지칭), A_{ps} 는 1개 덕트 내의 모든 강연선의 총단면적, f_{pi} 는 초기 프리스트레스, f_{pe} 는 유효 프리스트레스이다. 이는 보통 1개 거더에 포함된 모든 덕트들에 동일한 개수의 강연선을 삽입함을 고려한 것이다. A_c 및 I_c 는 각각 거더의 단면적 및 단면2차모멘트이고, A_c^* 및 I_c^* 는 거더와 바닥판의 합성단면의 단면적 및 단면2차모멘트로서 거더와 바닥판의 설계기준강도에 차이가 있을 경우에는 탄성계수비를 통해 거더의 물성으로 환산한 단면을 의미한다. 이 논문의 기호들에서 공통적으로 뒀침자 *는 합성단면을 의미한다. e_p 는 텐던의 편심으로 엄밀히 말해 덕트마다 편심의 차이가 있으나 근사적으로 평균값을 사용하였다. 또한, 덕트의 개수에 따라 평균 편심도 다소 변하지만 뒤에 전개할 수식에서는 수식을 간략화하기 위해 e_p 가 일정하다고 가정하였다. 실제로 덕트의 개수가 늘어나더라도 프리스트레싱의 효율성상 평균 편심을 가능한 한 크게 유지하려고 하는 경우가 많으므로 본 가정은 큰 오차 없이 유효하다고 생각된다. y_t 및 y_b 는 각각 거더의 중립축에서 상연 및 하연까지의 거리이고, $y_{t, g}^*$ 및 $y_{b, g}^*$ 는 각각 합성단면의 중립축에서 거더 상연 및 하연까지의 거리이다. $f_{ci, g, ta}$ 및 $f_{ci, g, ca}$ 는 각각 거더의 초기 허용인장응력 및 초기 허용압축응력이며, $f_{ck, g, ta}$ 및 $f_{ck, g, ca}$ 는 각각 거더의 사용시 허용인장응력 및 사용시 허용압축응력이다. 국내 설계기준(한국도로교통협회, 2005; 한국콘크리트학회, 2007)에 따르면 이들 허용응력들을 다음과 같이 거더의 초기 압축강도 $f_{ci, g}$ 와 설계기준강도 $f_{ck, g}$ 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다, $f_{ci, g, ta} = a_1 \sqrt{f_{ci, g}}$, $f_{ci, g, ca} = a_2 f_{ci, g}$, $f_{ck, g, ta} = a_3 \sqrt{f_{ck, g}}$, $f_{ck, g, ca} = a_4 f_{ck, g}$. M_{d1} 및 M_{d2} 는 각각 거더 자중 및 바닥판 자중에 의한 휨모멘트로 $M_{d1} = b_1 w_{d1} l^2 = b_1 (\gamma_c A_c) l^2$, $M_{d2} = b_2 (w_{d2} + w_c) l^2 = b_2 (\gamma_c A_d + w_c) l^2$ 이고, 여기에서 γ_c 및 $\gamma_{c, d}$ 는 각각 거더와 바닥판 콘크리트의 단위중량, A_d 는 바닥판의 단면적, l 은 경간이다. M_{d2} 에는 시공 단계상 가로보의 자중에 의한 w_c 가 함께 고려되었다. 또한 M_l 은 활하중에 의한 휨모멘트로서 포장이나 방호벽에 의한 2차 고정하중도 포함된 개념이며, $M_l = b_3 w_l l^2$ 이다. 여기에서 w_l 은 바닥판에 작용하는 여러 가지 경우의 설계 활하중에 대해 거더의 횡분배 이론을 적용하여 거더에 작용하는 최대 활하중 휨모멘트를 구한 후 이를 분포하중으로 치환한 것이다. b_1 , b_2 , b_3 는 분포하중에 의해 경간 중앙에서 발생하는 휨모멘트를 산정하기 위한 계수로서 단순교의 경우 0.125이고 연속교의 경우에는 이보다 감소하여 예를 들어 2

경간 연속교의 경우에는 0.07이다. 활하중 효과를 분포하중으로 간주할 수 있는 근거는 이 연구의 검토 대상인 장경간 PSC 거더교와 같이 교량의 경간이 길어질 경우 집중하중인 DB 하중보다는 분포하중인 DL 하중이 지배적이라는 데 있다. 한편, 가로보 자중에 의한 집중하중이나 DL 하중에 포함되는 집중하중의 경우에는 등가의 분포하중으로 치환해야 하는데 이는 경간 중앙에서 동일한 휨모멘트를 발생시키도록 근사적인 분포하중의 크기를 정하면 된다.

이상의 수식들을 압축이 +, 인장이 - 부호임을 염두하고 식 (2)~(5)에 대입하여 정리하면 각각 식 (6)~(9)와 같다.

$$l > \sqrt{\frac{I_c}{b_1 \gamma_c A_c y_t} \left[n A_{ps} f_{pi} \left(\frac{e_p y_t}{I_c} - \frac{1}{A_c} \right) - a_1 \sqrt{f_{ci, g}} \right]} \quad (6)$$

$$l > \sqrt{\frac{I_c}{b_1 \gamma_c A_c y_b} \left[n A_{ps} f_{pi} \left(\frac{e_p y_b}{I_c} - \frac{1}{A_c} \right) - a_2 f_{ci, g} \right]} \quad (7)$$

$$l < \sqrt{\frac{n A_{ps} f_{pe} \left(\frac{e_p y_t}{I_c} - \frac{1}{A_c} \right) + a_4 f_{ck, g}}{\frac{[b_1 \gamma_c A_c + b_2 (\gamma_c A_d + w_c)] y_t + b_3 w_l y_{t, g}^*}{I_c} + \frac{b_3 w_l y_{t, g}^*}{I_c^*}}} \quad (8)$$

$$l < \sqrt{\frac{n A_{ps} f_{pe} \left(\frac{e_p y_b}{I_c} + \frac{1}{A_c} \right) + a_3 \sqrt{f_{ck, g}}}{\frac{[b_1 \gamma_c A_c + b_2 (\gamma_c A_d + w_c)] y_b + b_3 w_l y_{b, g}^*}{I_c} + \frac{b_3 w_l y_{b, g}^*}{I_c^*}}} \quad (9)$$

후속 논문(전세진, 2009)의 예제에서 자세히 분석하겠지만 식 (6)~(9)를 가로축은 덕트 개수 n , 세로축은 경간 l 인 그래프로 나타내면 예시된 그림 2와 같으며 부등식의 영역으로부터 설계가 가능한 영역이 형성됨을 알 수 있다. 설계 가능 영역에서 배치 가능한 최대 덕트 개수 및 이에 대응되는 최대 경간을 찾을 수 있다. 그림 2는 최대 6개의 덕트를 삽입하여 약 40 m의 경간을 확보할 수 있는 것으로 나타나는 예제이다. 만약 주어진 단면에서 배치 가능한 정착구와 덕트 개수에 제한이 있다면 이를 그래프에 수직선으로 함께 나타내면 되며, 그림 2는 한 예로 이러한 수직선이 설계 가능 영역 바깥에 위치하는 경우이므로 경간에 미치는 영향이 없지만 만약 수직선이 설계 가능 영역을 양분할 경우에는 분할된 영역 중 왼쪽 영역만을 고려해야 한다. 제안된 도식적인 방법의 또다른 장점은 안전성 평가식들 중에서 설계 가능 영역을 좌우하는 식들을 즉시 파악할 수 있다는 것이다. 따라서, 이러한 식에 포함된 장경간화 관련 변수들을 실제 적용 가능한 범위 내에서 조절해가며 그래프의 x 절편 또는 y 절편과 기울기를 변경함으로써 설계 가능 영역을 확장하고 장경간화의 바람직한 방향을 도출할 수 있다. 가능하면 식 (6)~(9) 중 특정한 식은 설계 가능 영역과 멀리 위치하여 여유도가 너무 큰 반면 다른 식은 설계 가능 영역을 너무 극단적으로 지배하는 경우가 발생하지 않도록 곡선들의 형태를 조절해 나가는 것이 효율적으로 장경간을 추구하는 방법론이라 할 수 있다.

한가지 주의해야 할 점으로 식 (2) 및 (3)(또는 식 (6) 및 (7))은 긴장시 자중이 작용해도 솟음(camber)이 남아 있어서 PSC 거더의 단순지지 조건이 형성되는 일반적인 경우에 유효하며 솟음이 없는 경우에는 별도 검토가 요망된다.

식 (6)~(9)를 살펴보면 각각의 변수에 경간에 영향을 미치

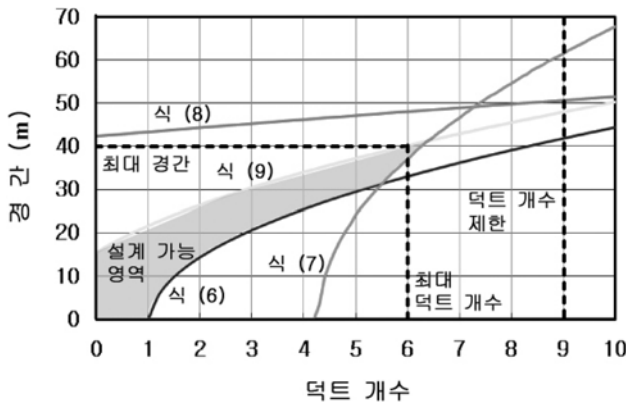


그림 2. 일반 PSC 거더교의 경간 평가 예

표 1. 장경간화 기법과 관련된 변수

장경간화 기법	기법이 반영되는 변수
고강도 콘크리트	$f_{ci,g}, f_{ck,g}, f_{ci,d}$
경량 콘크리트	$\gamma_c, \gamma_{c,d}$
대직경 긴장재 또는 1개 덱트당 다수의 긴장재	A_{ps}
고강도 긴장재	f_{pr}, f_{pe}
단면형상 최적화	$I_c, A_c, I_c^*, A_c^*, y_p, y_b, y_{t,g}^*, y_{t,d}^*, y_b^*, e_p, e_{p,1}, e_{p,2}, e_{p,2}^*$
연속화	b_2, b_3
허용응력의 증가	a_1, a_2, a_3, a_4
개선된 거더 횡분배 기법	w_l

는 요인들이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이러한 변수들이 그림 2의 설계 가능 영역의 크기를 좌우하게 되며 결국 최대 경간에 영향을 미치는 것이다. 2장에서 소개했던 각각의 장경간화 기법에 관련된 변수들을 정리하면 표 1과 같다. 표 1의 기호들 중 앞서 소개되지 않았던 일부 기호의 의미는 뒤에서 설명하도록 한다. 2장의 장경간화 기법들에 부가하여, 설계기준별 허용응력의 차이가 장경간화에 미치는 영향은 $a_1 \sim a_4$ 에 반영되고, 여러 가지 거더 횡분배 기법 중에서 좀 더 정확한 기법을 사용함으로써 보수적인 기법과 비교할 때 거더에 작용하는 활하중을 감소시켜 장경간화에 기여하는 효과는 w_l 에 반영되므로 이러한 사항들을 표 1에 함께 나타내었다. 표 1은 뒤에서 소개할 다단계 긴장식 PSC 거더 및 Decked PSC 거더에도 동일하게 적용되는 사항이다.

3.2.2 다단계 긴장식 PSC 거더

거더 제작시 1차 텐던을 긴장하고 바닥판 타설 후 2차 텐던을 긴장하는 다단계 긴장식 PSC 거더의 경우에는 일반 PSC 거더의 검토 단계에 부가하여 바닥판 타설시와 2차 긴장시에도 응력을 검토해 보아야 한다. 2차 긴장을 실시하는 시점에 따라 다음과 같이 2가지의 경우로 나뉜다.

1) 바닥판 합성 전 2차 긴장시

1차 긴장시의 검토는 식 (6) 및 (7)에서 n 대신 1차 텐던의 개수인 n_1 를 사용하고 e_p 대신 1차 텐던의 편심인 $e_{p,1}$ 을 사용한다는 것 외에는 동일하다. 바닥판 타설시에 대한 검토식을 정리하면 식 (10) 및 (11)과 같고, 2차 긴장시에 대해

서는 식 (12) 및 (13)이 유도된다. 사용시의 검토식은 식 (8) 및 (9)에서 분자 부분을 1차 텐던 및 2차 텐던에 대한 항으로 분리하여 나타낸다는 것 외에는 동일하다.

$$l < \sqrt{\frac{n_1 A_{ps} f_{pe} \left(\frac{e_{p,1} y_t}{I_c} - \frac{1}{A_c} \right) + a_4 f_{ck,g}}{[b_1 \gamma_c A_c + b_2 (\gamma_{c,d} A_d + w_c)] y_t}} \quad (10)$$

$$l < \sqrt{\frac{n_1 A_{ps} f_{pe} \left(\frac{e_{p,1} y_b}{I_c} + \frac{1}{A_c} \right) + a_3 \sqrt{f_{ck,g}}}{[b_1 \gamma_c A_c + b_2 (\gamma_{c,d} A_d + w_c)] y_b}} \quad (11)$$

$$l > \sqrt{\frac{n_1 A_{ps} f_{pe} \left(\frac{e_{p,1} y_t}{I_c} - \frac{1}{A_c} \right) + n_2 A_{ps} f_{pi} \left(\frac{e_{p,2} y_t}{I_c} - \frac{1}{A_c} \right) - a_3 \sqrt{f_{ck,g}}}{[b_1 \gamma_c A_c + b_2 (\gamma_{c,d} A_d + w_c)] y_t}} \quad (12)$$

$$l > \sqrt{\frac{n_1 A_{ps} f_{pe} \left(\frac{e_{p,1} y_b}{I_c} + \frac{1}{A_c} \right) + n_2 A_{ps} f_{pi} \left(\frac{e_{p,2} y_b}{I_c} + \frac{1}{A_c} \right) - a_4 f_{ck,g}}{[b_1 \gamma_c A_c + b_2 (\gamma_{c,d} A_d + w_c)] y_b}} \quad (13)$$

여기에서, n_2 는 2차 텐던의 개수, $e_{p,2}$ 는 2차 텐던의 편심이다. 그림 3은 이상에서 언급한 다단계 긴장과 관련된 8개의 식을 도식화한 예제로서 2차 텐던을 1개로 고정시킨 상태에서 1차 텐던의 개수와 경간의 관계를 나타낸 것이다. 2차 텐던의 개수를 변경해 가며 그림 3과 같은 그래프를 구성하면 각각의 2차 텐던의 개수에 대해 가능한 최대 경간을 구할 수 있다. 또한, 설계 가능 영역이 존재하지 않는 2차 텐던의 개수를 파악함으로써 최대로 삽입 가능한 2차 텐던의 개수도 알 수 있다. 다단계 긴장식 PSC 거더 역시 그림 3을 통해 8개의 식들 중에서 설계 가능 영역을 좌우하는 식들을 즉시 파악할 수 있는 장점이 있으며, 이 예제의 경우에는 사용시 하연의 인장응력이 최대 경간을 결정하는 주요 요인이 되고 있다.

2) 바닥판 합성 후 2차 긴장시

이 경우 1차 긴장시와 바닥판 타설시의 검토는 앞선 1)의 경우와 동일하다. 1)과의 큰 차이는 2차 긴장시에 발생하는 데, 즉, 1)에서는 2차 긴장의 영향이 거더에만 미치는 반면 2)에서는 거더와 바닥판이 합성된 단면에 미치게 된다. 따라서, 상연의 경우 거더 상연과 더불어 바닥판 상연에 대한 검토가 추가되어야 한다. 2차 긴장시 거더 상하연 응력 검토식은 1)에서의 식 (12) 및 (13)과 유사하되 다만 2차 텐던

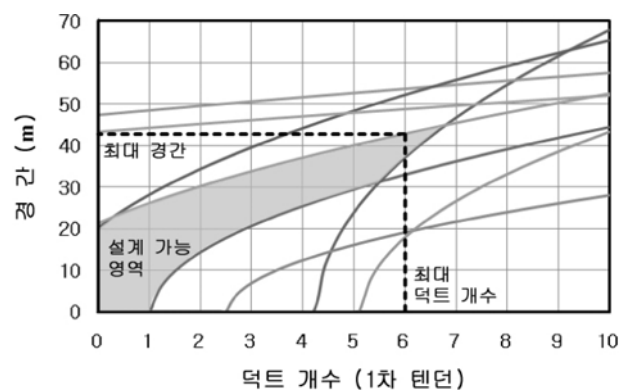


그림 3. 다단계 긴장에 대한 경간 평가 예

표 2. 기존 설계와 제안 기법의 비교

항 목	제안된 도식적 기법	기존의 일반적인 교량 설계
가능한 공간	한번의 검토로 파악 가능	특정한 공간을 가정하며 여러번 반복설계를 해야 범위 파악 가능
텐던 개수와 경간의 관계	한번의 검토로 파악 가능	텐던 개수와 경간의 조합을 여러 가지로 바꾸어지며 일일이 검토해야 하므로 엄밀한 관계 파악이 어려움
장경간화 기법의 영향	장경간화 기법 적용시 그래프의 형태 변화를 통해 적용 효과를 용이하게 파악 가능	장경간화 기법을 적용하여 재설계를 실시하고 기존 설계와 비교해 보아야 하지만, 이 경우조차 장경간화 기법의 영향을 일목요연하고 명확히 파악하기는 어려움
경제적인 단면 설계	그래프 상의 설계 가능 영역의 형태와 목표 경간을 비교하면 안전율도 함께 파악되므로 목표 안전율 수준에 따른 경제적인 단면 설계 가능	안전성의 확보 또는 미확보 여부가 주된 관심사이고 안전율을 적절한 수준으로 조절하기 위한 체계적인 정보가 부족하므로, 전문가적 소견이 부족할 경우 비경제적인 단면으로 설계될 가능성이 큼

관련항에 포함된 $e_{p,2}$, y_b , y_c , I_c , A_c 가 각각 $e_{p,2}^*$, $y_{t,g}^*$, y_b^* , I_c^* , A_c^* 로 바뀐다는 점만 달라진다. 바닥판 상연의 응력 $f_{ci,d}$ 에 대한 검토식인 식 (14)는 그래프에 추가되지는 않지만 식 (15)와 같이 2차 텐던의 개수를 제한하는 식을 산출한다. 이는 같은 다단계 긴장이라도 2)가 1)보다 장경간화에 있어 불리한 원인 중 하나이다.

$$f_{ci,d} = \frac{1}{n_e} \left(\frac{P_{i,2}}{A_c^*} - \frac{P_{i,2} e_{p,2}^*}{I_c^*} y_{t,d}^* \right) > -a_1 \sqrt{f_{ci,d}} \quad (14)$$

$$n_2 < \frac{n_e a_1 \sqrt{f_{ci,d}}}{A_{ps} f_{pi} \left(\frac{e_{p,2}^* y_{t,d}^*}{I_c^*} - \frac{1}{A_c^*} \right)} \quad (15)$$

여기에서, n_e 는 바닥판과 거더의 탄성계수비, $e_{p,2}^*$ 는 합성단면에서 2차 텐던의 편심, $y_{t,d}^*$ 는 합성단면 도심에서 바닥판 상연까지의 거리, $f_{ci,d}$ 는 바닥판의 초기 압축강도이다. 사용시의 검토는 1)과 유사한 검토식을 적용하되 앞과 마찬가지로 2차 긴장의 영향이 합성단면에 미친다는 점만 수정해주면 된다. 이상의 수식들을 도식화하면 1)에서 산출된 그림 3과 유사하게 8개의 그래프 및 설계 가능 영역이 생성되지만 동일한 PSC 거더 제원이라 해도 수식에 포함된 변수들의 차이로 인해 1)과 2)에서 산출되는 그래프 형태는 약간 달라지게 된다.

3.2.3 Decked PSC 거더

Decked PSC 거더의 경우 거더와 일체로 제작되는 바닥판의 상연 및 거더 하연에 대해 긴장시와 사용시의 평가를 실시하면 된다. 긴장시에는 거더 자중에 부가하여 이미 바닥판과 가로보의 자중이 작용하고 있다는 점 및 합성단면이 구성되어 있다는 점을 고려하여 식 (6) 및 (7)을 수정하면 되고, 사용시에는 역시 합성단면을 고려하여 식 (8) 및 (9)를 수정하여 사용하면 된다. 이를 그래프로 나타내면 그림 2와 유사하지만 역시 수식에 포함된 변수들의 차이로 인해 형태가 달라지며, 일반적으로 설계 가능 영역이 일반 PSC 거더보다 훨씬 넓어져서 장경간화에 더욱 유리한 것으로 나타난다.

4. 기존 설계와 제안 기법의 비교

표 2에서는 기존 PSC 거더교의 설계 절차와 차별화되는

본 제안 기법의 장점을 부각해 보았다. 기존 교량 설계에서는 가정된 교량 제원(단면 형상, 텐던 개수, 경간 등)이나 물성을 바탕으로 시공 단계나 사용시 교량의 안전성이 확보되는지를 주로 검토하게 된다. 따라서 예를 들어 단면 형상이나 물성이 확정되어 주어진 경우라 하더라도 가능한 텐던 개수나 경간을 파악하기 위해서는 텐던 개수와 경간에 대한 수많은 조합들을 일일이 검토해 볼 수 밖에 없다. 이러한 통상적인 절차를 따른 경우 특히 설계 사례 및 공용 경험이 드문 장경간 PSC 거더교 설계에 있어서는 반복 설계에 따른 시간, 노력, 비용 및 시행착오는 별도로 하더라도 안전율이 과도하게 높은 비경제적인 단면이 산출될 우려 또한 크다. 제안된 기법을 활용하면 이러한 기존 설계의 한계점을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

참고로 Naaman(2004)은 일반 PSC 거더에 한해서 편심과 긴장력의 관계를 도식화한 기존 연구를 소개하고 있다. 이는 표 2에서 언급한 기존 설계와 비교할 때 설계자에게 추가의 통찰력을 부여한다는 장점이 있지만, 일단 경간을 특정값으로 고정시킨 상태에서 적용하므로 장경간 거더의 경간 분석에 활용되기에는 불편함이 있다. 반면 제안된 기법은 경간 분석용으로 최적화된 도식적인 기법이라는 차이가 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 기타 교량 공법에 비해 경제적인 PSC 거더교를 기존의 25~35 m 경간에서 50 m 이상으로 장경간화하고자 할 때 유용하게 활용할 수 있는 경간 평가 기법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 재료, 설계 및 시공 측면에서 적용 가능한 장경간화 기법들을 분류하여 보았다. 또한 허용 응력설계법에 근거한 PSC 거더의 단계별 안전성 평가식을 프리스트레싱 텐던의 개수와 경간의 관계를 나타내는 그래프로 치환하여 설계 가능 영역을 찾아내는 도식적인 방법을 일반 PSC 거더, 다단계 긴장식 PSC 거더, Decked PSC 거더로 나누어 제시하였다. 각각의 장경간화 기법은 이러한 설계 가능 영역의 형태에 영향을 미치므로 제안된 절차를 통해 각 기법이 경간에 미치는 기여도를 일목요연하고 용이하게 평가할 수 있다. 또한 평가식들 중에서 설계 가능 영역과 경간을 결정하는 데 있어 지배적인 영향을 미치는 중요 평가식을 추출할 수 있으므로 장경간화를 위해 우선적으로 개선해야 할 시공 단계 및 개선 사항들을 신속히 파악할

수 있는 장점도 있다. 이 논문과 연결되는 후속 논문에서는 이러한 기법들을 실교량에 적용하여 PSC 거더의 장경간화 가능성을 고찰해 보았으며 경간에 미치는 영향이 비교적 커서 여러 가지 장경간화 기법들 중 우선적으로 적용해야 할 기법들을 선별해 보았다.

참고문헌

김광수, 양인환(2008) 국내의 신형식 PSC 빔 거더교 개발 현황, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제20권 제3호, pp. 26-33.

박영하, 김우중(2008) 표준 형식 PSC 빔 거더교의 저형고 장경간화, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제20권 제3호, pp. 20-25.

박영하, 박인석, 박민석(2005) 단순지지 PSC I 거더교의 거더높이 최소화 최적설계, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 337-340.

신현묵(2008) **프리스트레스트 콘크리트**, 제10판, 동명사.

심종성, 배인환, 김정구(1999) 장경간 PSC-I형 거더 설계를 위한 해석적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제1-4호, pp. 581-590.

심종성, 오홍섭, 김민수(2000) 장지간 교량을 위한 PSC-I형 거더의 단면 설계변수 연구, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제12권 6호, pp. 13-22.

이형준, 전세진, 김영진(2008) PSC 교량의 저형고 장경간화에 대한 연구 개발, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제20권 제3호, pp. 14-19.

이형준, 정원기, 윤석구(2002) 고강도콘크리트 PSC 빔 교량부재의 정적 구조거동, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제5A호, pp. 1023-1036.

전세진(2009) PSC 거더교의 장경간화 평가 기법: II. 예제 분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제3A호, pp. 243-250.

조선규, 윤석구, 박영하(2004) 표준단면을 위한 프리스트레스트

콘크리트 거더의 단면최적설계, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제4A호, pp. 853-859.

한국도로공사 도로연구소(1998) **콘크리트 장경간보 개발에 대한 연구**.

한국도로교통협회(2005) **도로교설계기준**.

한국콘크리트학회(2007) **콘크리트구조설계기준**.

Abdel-Karim, A.M. and Tadros, M.K. (1992) *State-of-the-Art of Precast/Prestressed Concrete Spliced I-Girder Bridges*, Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI).

Bardow, A.K., Seraderian, R.L., and Culmo, M.P. (1997) Design, fabrication and construction of the New England Bulb-Tee girder, *PCI Journal*, Vol. 42, No. 6, pp. 30-40.

Han, M.Y., Hwang, E.S., and Lee, C.D. (2003) Prestressed concrete girder with multistage prestressing concept, *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, pp. 723-731.

Meir, J.V., Ciccirelli, M.R., Ramirez, J.A., and Lee, R.H. (1997) Alternatives to the current AASHTO standard bridge sections, *PCI Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 56-66.

Melby, K., Jordet, E.A., and Hansvold, C. (1996) Long-span bridges in Norway constructed in high-strength LWA concrete, *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 11, pp. 845-849.

Naaman, A.E. (2004) *Prestressed Concrete Analysis and Design - Fundamentals*, 2nd Ed. Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI) (2003) *Precast Prestressed Concrete Bridge Design Manual*, 2nd Ed.

Smith, M.Z., Li, Y., and Ahlborn, T.M. (2008) Analysis of longitudinal joint connections for decked precast prestressed concrete girder bridges, *Proceedings: Accelerated Bridge Construction - Highway for Life Conference*.

White, C.D. and Castrodale, R.W. (2004) *Extending Span Ranges of Precast Prestressed Concrete Girders*, National Cooperative Highway Research Program(NCHRP) Report 517, Transportation Research Board.

(접수일: 2009.1.30/심사일: 2009.3.30/심사완료일: 2009.3.30)